

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na
bibliografske podatke, kot je navedeno:

Žibert, T., 2016. Razsoljevanje kot nov vir
pitne vode. Diplomski naloga. Ljubljana,
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za
gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brilly,
M., somentor Drev, D.): 40 str.

Datum arhiviranja: 21-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's
bibliographic information as follows:

Žibert, T., 2016. Razsoljevanje kot nov vir
pitne vode. B.Sc. Thesis. Ljubljana,
University of Ljubljana, Faculty of civil
and geodetic engineering. (supervisor
Brilly, M., co-supervisor Drev, D.): 40 pp.

Archiving Date: 21-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM VODARSTVO IN
KOMUNALNO INŽENIRSTVO**

Kandidat:

TOMAŽ ŽIBERT

RAZSOLJEVANJE KOT NOV VIR PITNE VODE

Diplomska naloga št.: 321/VKI

DESALINATION AS A NEW WATER SOURCE

Graduation thesis No.: 321/VKI

Mentor:

prof. dr. Mitja Brilly

Somentor:

doc. dr. Darko Drev

Ljubljana, 13. 09. 2016

Ta stran je namenoma prazna.

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Spodaj podpisani študent Tomaž Žibert vpisna številka 26105226 avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Razsoljevanje kot nov vir pitne vode.

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	628.1(497.4)(043.2)
Avtor:	Tomaž Žibert
Mentor:	prof. dr. Mitja Brilly
Somentor:	doc. dr. Darko Drev
Naslov:	Razsoljevanje kot nov vir pitne vode
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	40 str., 14 sl.
Ključne besede:	Razsoljevanje, sladka voda, morska voda, oskrba z vodo, vpliv na okolje.

Izvleček: Razsoljevanje slane morske vode je v svetu postala ena glavnih metod za pridobivanje sladke vode. Zanj so se odločale predvsem države, ki nimajo bogatih tradicionalnih virov celinske vode (denimo države Bližnjega vzhoda), vse več pa se zanj odločajo tudi druge države, predvsem zaradi dodatnih potreb po sladki vodi, nižji ceni razsoljevanja in napredujočih tehnologij. V diplomski nalogi so obravnavane različne tehnologije, njihove prednosti ter slabosti, vplivi na okolje in opisana je študija postavitev obrata za zagotavljanje vode obmorskemu mestu, in sicer z razsoljevanjem morske vode. Študija vsebuje izbiro velikosti naprave glede na potrebe mesta in oceno stroškov takšne naprave (investicija, obratovanje, vzdrževanje). V zaključku so predstavljeni rezultati izračunov in podan je komentar, o realnosti izračunov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 628.1(497.4)(043.2)
Author: Tomaž Žibert
Supervisor: Prof. Mitja Brilly, Ph.d.
Co-supervisor: assist. prof. Darko Drev, Ph. D.
Title: Desalination as a new water source
Documenttype: Graduation thesis – University studies
Notes: 40 p., 14 fig.
Key words: Desalination, fresh water, sea water, water supply, environmental impact.

Abstract: Desalination has become one of the main methods for producing drinking water, especially in the countries without safe drinking water sources (for example the Midwest countries). However, there is an increasing demand for such a water source also in other countries due to increasing demand for drinking water, lower cost of desalination and advances in technology. This thesis describes different technologies, their strengths and weaknesses, environmental impact and presents a study of a desalination device set-up to supply a nearby city. The study contains a selection of the size of the device depending on the needs of the city and estimates the cost of such a device (investment, operation, maintenance). In conclusion, calculation results are given with comment on calculation results obtained.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	RAZSOLJEVANJE.....	2
3	TEHNOLOGIJE RAZSOLJEVANJA	7
3.1	TERMIČNI PROCES	8
3.1.1	VEČFAZNA RAVNOTEŽNA DESTILACIJA (MULTI STAGE FLASH).....	8
3.1.2	VEČSTOPENJSKA DESTILACIJA (MED).....	10
3.1.3	KOMPRESIJA HLAPOV (VC).....	11
3.2	MEMBRANSKI PROCES.....	12
3.2.1	REVERZNA OSMOZA (RO)	13
3.2.2	ELEKTRODIALIZA (ED).....	15
4	VPLIV NA OKOLJE	16
4.1	VIR SLANE VODE	16
4.2	IZSTOPNA SLANICA	17
4.3	TEMPERATURA MORSKE VODE.....	18
4.4	TOPLOGREDNI PLINI.....	18
4.5	RAZTOPLJEN KISIK	18
4.6	KONCENTRACIJA KLORA	18
4.7	TEŽKE KOVINE.....	19
5	EKSPERIMENT	20
5.1	VARIANTA 1 – 100 l.....	21
5.1.1	Podatki.....	21
5.1.2	Tlačne izgube	22
5.1.3	Poraba električne energije	24
5.1.4	Ekonomska analiza.....	26
5.1.4.1	Stroški letnega obratovanja	26
5.1.4.2	Stroški omejenega obratovanja	27
5.2	VARIANTA 2 – 200 l.....	27

5.2.1	Podatki	27
5.2.2	Tlačne izgube.....	28
5.2.3	Poraba električne energije	30
5.2.4	Ekonomska analiza	31
5.2.4.1	Stroški letnega obratoavnja	31
5.2.4.2	Stroški omejenega obratovanja.....	32
5.3	VARIANTA 3 – 300 l	32
5.3.1	Podatki	32
5.3.2	Tlačne izgube.....	33
5.3.3	Poraba električne energije	34
5.3.4	Ekonomska analiza	36
5.3.4.1	Stroški letnega obratovanja	36
5.3.4.2	Strošek omejenega obratovanja	36
5.4	KOMENTAR	37
6	ZAKLJUČEK	38
7	VIRI.....	39

KAZALO SLIK

Slika 1: Razširjenost razsoljevanja po svetu leta 2006.....	3
Slika 2: Razširjenost razsoljevanja v državah Perzijskega zaliva leta 2006	4
Slika 3: Razširjenost razsoljevanja v državah Sredozemlja leta 2006	5
Slika 4: Shema MSF razsoljevalnika	9
Slika 5: MSF naprava za razsoljevanje v Dubaju	9
Slika 6: Shema MED naprave	10
Slika 7: Shema MVC procesa	11
Slika 8: Primer MVC naprave	12
Slika 9: Osnovni princip osmoze, osmotskega ravnotežja in reverzne osmoze	14
Slika 10: Shema razsoljevanja z ED	15
Slika 11: Shema vstopnih in izstopnih elementov pri razsoljevanju	16
Slika 12: Obrat razsoljevanja Al Ghubrah v Omanu.....	17
Slika 13: Delež stroškov razsoljevalne naprave RO	20
Slika 14: Poraba energije za črpanje glede na oddaljenost črpališča od razsoljevalne naprave	22

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Voda izpolnjuje drugo najpomembnejše človekovo fiziološko potrebo (za kisikom za dihanje), saj omogoča življenje, daje hrano, neposredno je odgovorna za nastanek velikih predantičnih in antičnih civilizacij (Mezopotamija, Kitajska, Egipt, itd.), obenem pa danes po njej poteka večina globalnega transporta (oceani, morja, reke).

Voda je nedvomno najpomembnejša snov za večino življenja, kot ga poznamo na Zemlji, a je hkrati kar 97 odstotkov ni pitne. Človeška inovativnost je že v preteklih tisočletjih razvila metode pridobivanja sladke (pitne) vode iz morske. Ta postopek imenujemo razsoljevanje.

Razlog za izbiro tovrstne teme za diplomsko nalogo je moje zanimanje za problematiko oskrbe prebivalstva s pitno vodo. Kljub dejstvu, da Slovenija spada med evropske države z največjimi zalogami sladke vode, se le redka gospodinjstva oskrbujejo preko »divjih« zajetij. Oskrba je centralizirana in voda prihaja do prebivalcev preko vodovoda. Na ta način je zagotovljena učinkovitejša porazdelitev, kvaliteta vode pa je lahko bolje regulirana. Kljub tovrstni organizaciji se občasno še vedno pojavljajo težave z oskrbo zaradi različnih vzrokov, zato so morebitne rešitve, v uvedbi dodatnih možnosti oskrbe ali pa v odmaknitvi od odvisnosti le od enega vira vode.

Moja diplomska naloga je sestavljena iz teoretičnega dela ter iz študije postavitve razsoljevalnega sistema. V teoretičnem delu so opisani procesi in vrste razsoljevanja, zgodovina ter razlogi za uporabo tehnologije. Obravnavni so tudi termični in membranski procesi ter vrste destilacij, filtracij in osmoz. Na kratko je predstavljena zgodovina uporabe razsoljevanja in njena razširjenost po svetu. Pri študiju postavitve razsoljevalne naprave so upoštevani tehnični in ekonomski parametri. Za osnovo sem uporabil opisane postopke obstoječih naprav in jih združil s potrebami svojega projekta – načrt je postavitev razsoljevalnega obrata za obmorsko mesto z 10.000 prebivalci v treh izvedenkah: z oskrbo 100, 200 in 300 litrov na prebivalca na dan. Za vsako izvedenko posebej sem izdelal izračune in ocenil stroške postavitve in obratovanja.

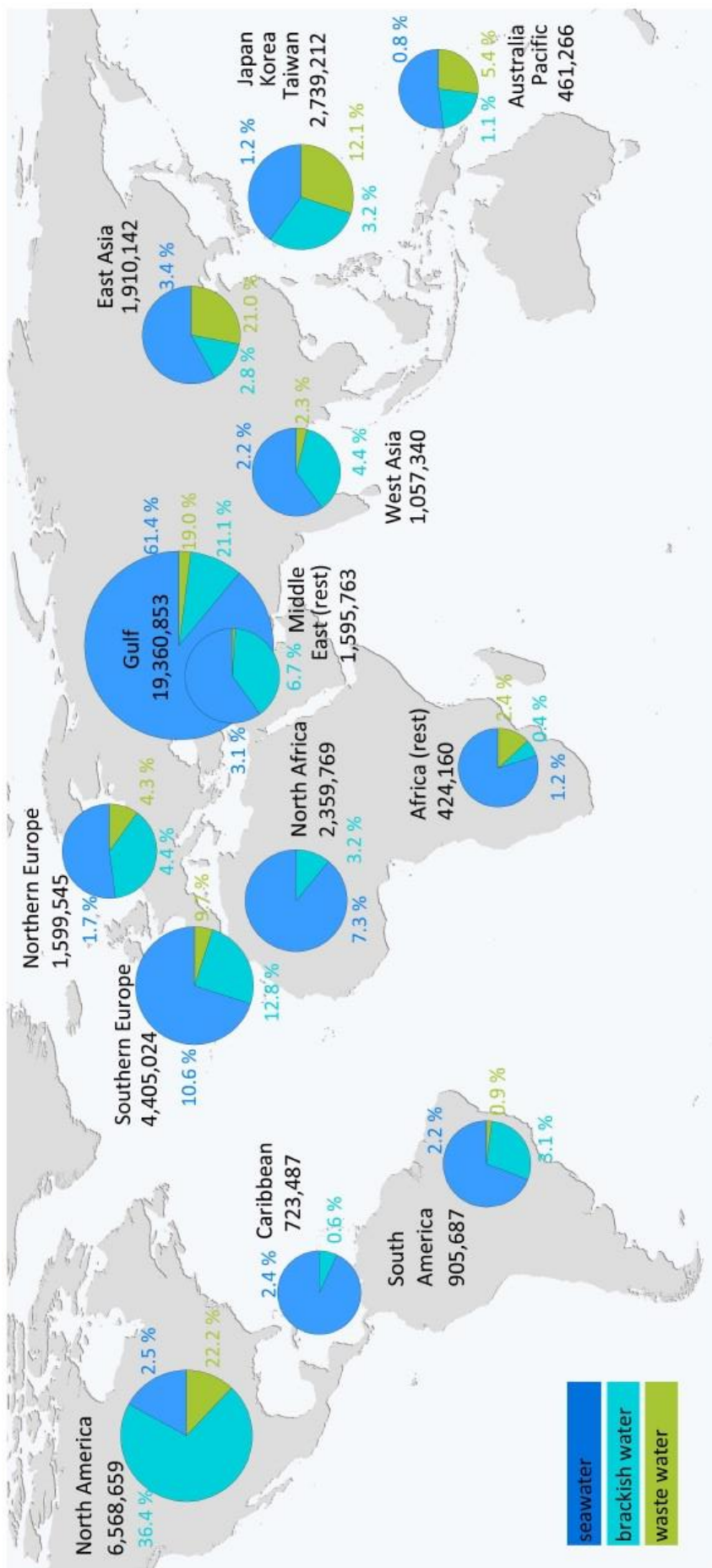
2 RAZSOLJEVANJE

Razsoljevanje slane vode v človekovi družbi ni nov pojav in je v uporabi že tisočletja, a namesto pridobivanja sladke vode je bil cilj pridobivanje soli. Ta je bila v preteklosti cenjena dobrina in njeno pridobivanje je bilo za države tudi strateškega pomena (denimo konzerviranje hrane za vojsko in pomorske odprave). Eno prvih pridobivanj pitne vode s procesom razsoljevanja je potekalo na ladjah med 17. in 19. stoletjem. Curaçao v Nizozemskih Antilih je bilo prvo območje na svetu, kjer so v prvi polovici 20. stoletja (1928) začeli odpirati prve večje razsoljevalne obrate. Leta 1938 je bil prvi obrat zgrajen v današnji Savdski Arabiji (Lattemann, 2010).

Za zgoraj omenjena območja je bilo razlogov za uporabo razsoljevanja več: pomanjkanje površinskih in podzemnih sladkih voda ter finančne in energetske zmožnosti za investiranje v tako drage in (v tistem času) pionirske objekte. Razlogov za uporabo razsoljevanja na novih trgih je več; med njimi gospodarska rast, povečevanje števila prebivalcev, urbanizacija, suše, pomanjkanje vode, podnebne spremembe, izrabljanje konvencionalnih vodnih virov (v smislu kvantitete in kvalitete) zaradi prekomernega črpanja, onesnaževanja ali slanosti. Poleg tega je razsoljevanje postalo ekonomsko bolj upravičena investicija, saj stroški črpanja in priprave konvencionalnih vodnih virov v nekaterih delih sveta naraščajo, stroški razsoljevanja (predvsem morske vode) pa padajo (Lattemann, 2010).

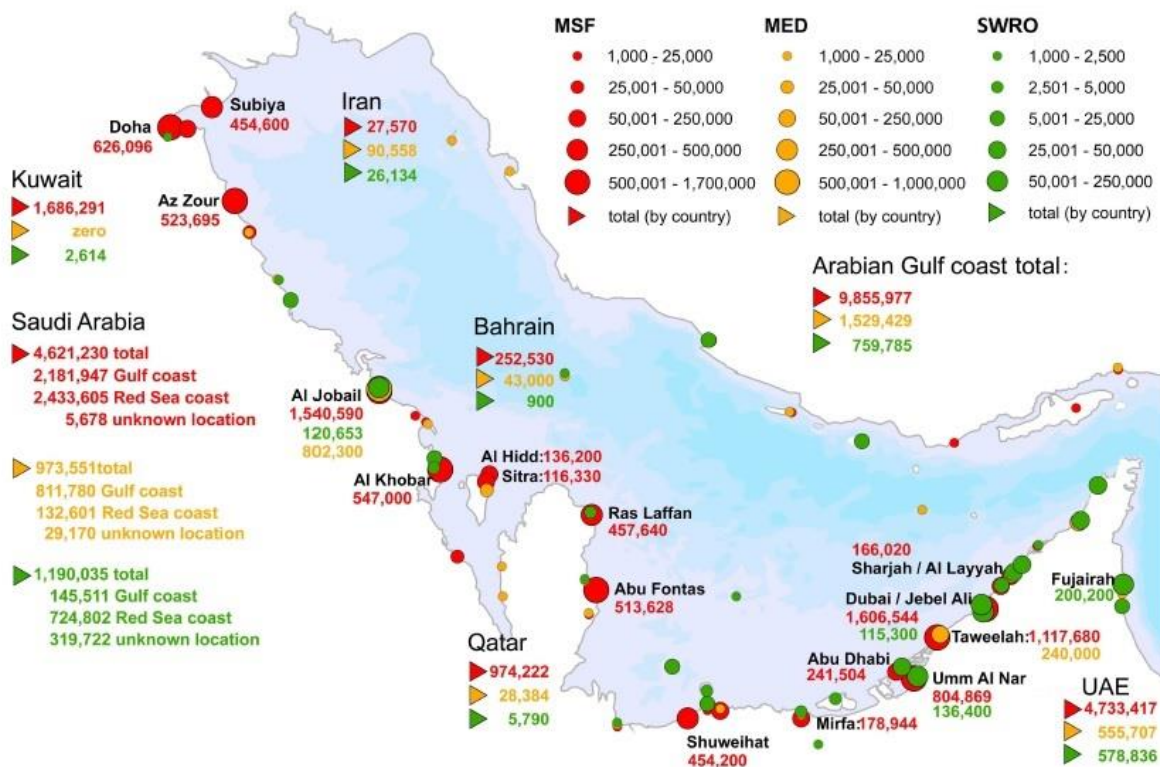
Številni zgodnji projekti so se osredotočali na termične procese. H gradnji prvega večjega sistema destilacijskih obratov na Bližnjem Vzhodu je med drugim prispeval tudi razvoj materialov, tehnologij prenosa toplote in protikorozijska tehnologija. Večstopenjska destilacija (MED) se je dolgo uporabljala v industriji, tradicionalno pri pridobivanju sladkorja in soli. V 50. letih 20. stoletja je razvoj večfazne ravnotežne destilacije (MSF) začel izpodrivati MED, in sicer zaradi večje odpornosti na vodni kamen. Od 80. let 20. stoletja je MED zaradi nižjih temperatur, potrebnih za proces in posledično manjše porabe energentov znova pričela pridobivati na uporabnosti (Lattemann, 2010).

Izbira postopka razsoljevanja po navadi temelji na parametrih, kot so: razpoložljivost slane vode in energentov, potreba po sladki vodi, kakovost zelene sladke vode (za industrijsko ali osebno rabo), razpoložljive tehnologije in proračun za izgradnjo obrata in njegovo obratovanje (Lattemann, 2010).



Slika 1: Razširjenost razsoljevanja po svetu leta 2006 (Lattemann, 2010)

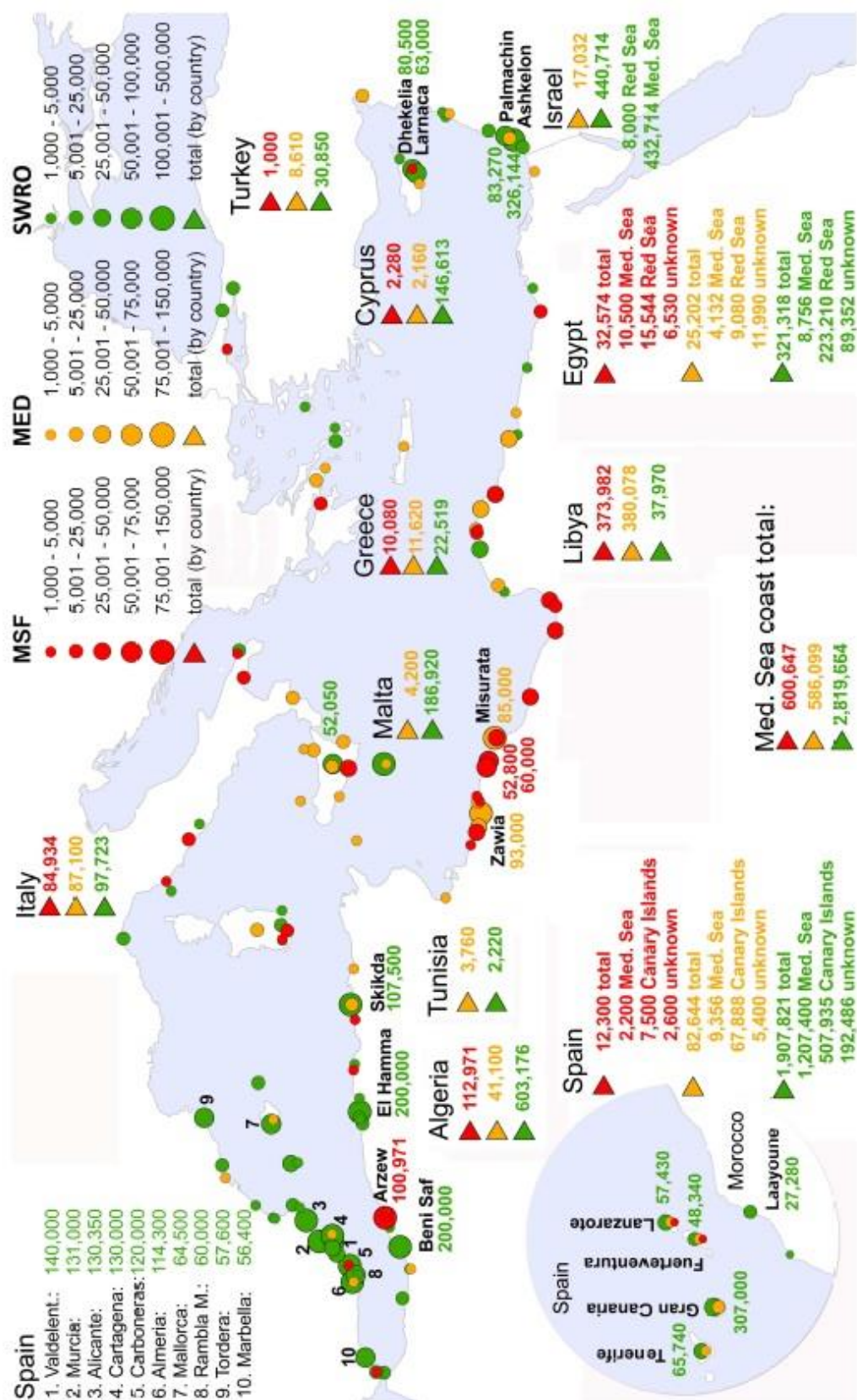
Približno 50 let je bilo potrebnih, da so se prve destilarne razvile v pomembno industrijo v 80. letih. V naslednjih desetih letih je uporaba razsoljevanja postala splošna praksa za pridobivanje vode v mestnih območjih. Danes so mesta glavni porabnik take vode (Lattemann, 2010).



Slika 2: Razširjenost razsoljevanja v državah Perzijskega zaliva leta 2006 (Lattemann, 2010).

Največ obratov za razsoljevanje se nahaja v Perzijskem zalivu (prim. Slika 2), kjer je bila leta 2016 proizvodnja 12,1 milijonov m³/dan, kar je znašalo 44 % celotne svetovne dnevne proizvodnje. Največja proizvodnja je bila v Savdski Arabiji (25 % svetovne proizvodnje, od tega 11 % ob Perzijskem zalivu, 12 % ob Rdečem morju in 2 % drugje), v Združenih arabskih emiratih (23 %) in Kuvajtu (6 %). V regiji prevladujejo termični procesi razsoljevanja, ki so del kogeneracije pri proizvodnji elektrike. Približno 81 % razsoljene vode je bilo produkt večfazne ravnotežne destilacije (v nadaljevanju MSF), 13 % večstopenjske destilacije (v nadaljevanju MED) in 6 % reverzne osmoze (v nadaljevanju RO).

Medtem ko v Perzijskem zalivu in Rdečem morju prevladujeta MSF in MED, v sredozemskih državah (prim. Slika 3) prevladuje reverzna osmoza z deležem okoli 70 %. Španija je država z največ pridobljene vode v Sredozemlju (okoli 2 milijona m³/dan), vendar je okoli 25 % te količine pridobljene na Kanarskih otokih v Atlantskem oceanu. Ostale sredozemske države, ki imajo velike razsoljevalne kapacitete (in jih še širijo), so: Alžirija, Egipt in Izrael.



Slika 3: Razširjenost razsoljevanja v državah Sredozemlja leta 2006 (Lattemann, 2010).

Danes so mnoge države Bližnjega Vzhoda odvisne od razsoljene vode. Podobno se danes tudi druge države, ki so se v preteklosti naslanjale na tradicionalne vire, odločajo za tehnologijo razsoljevanja. Z manjšanjem zalog sladke vode po svetu se morska voda smatra kot edini pravi neomejeni vodni vir. To temelji na dejstvu, da je 97 % vode na planetu shranjene v oceanih in morjih. Ena izmed negativnih lastnosti razsoljevanja je slanica, ki se iz obratov največkrat izloča v okolico, kar vpliva na okoljske ekosisteme (Lattemann, 2010).

3 TEHNOLOGIJE RAZSOLJEVANJA

Dve najpogostejši uporabljeni metodi razsoljevanja sta reverzna osmoza (v nadaljevanju RO), ki pokriva skoraj 60 % zmogljivosti, in večfazna ravnotežna destilacija (v nadaljevanju MSF), ki pokriva 26 %. Proces razsoljevanja pri RO poganja elektrika, medtem ko proces razsoljevanja pri MSF poganja toplota. Danes z izjemo Severne Afrike, Kitajske in Indije večina novih obratov razsoljevanja temelji na tehnologiji reverzne osmoze. Osnovi princip RO je enostaven. Slano vodo se pri visokem tlaku vodi skozi prepustne membrane ali filtre. Včasih se vodo vodi skozi več membran, preden se jo razglasi za končni produkt. Kakovost vode je odvisna od tlaka, membran in vsebnosti soli vode. RO lahko odstrani tudi neželene primesi, kot so pesticidi ali bakterije (Olsson, G. 2015).

Pri destilaciji je treba vodo najprej segreti in izpariti, da se odstrani raztopljene minerale, in nato ohladiti. Obrati, ki temeljijo na destilaciji ustvarijo manj odpadnih snovi kot RO obrati, poleg tega pa se ne morejo zamašiti nobeni filtri ali membrane. Obstajajo trije osnovni principi destilacije. Po navadi uporabijo mešanico tehnologij, ki so na voljo (Olsson, G. 2015):

- Večfazna ravnotežna destilacija (MSF): vodo se segreje, nato pa se zniža tlak, da se voda hipoma spremeni v paro.
- Večstopenjska destilacija (MED): voda prehaja skozi več serij izparilnikov. Para iz ene serije se uporabi za uparjanje vode v naslednji seriji.
- Kompresija hlapov (VC): vodo se najprej upari, paro pa stisne. Segreto stisnjeno paro se nato uporabi kot vir toplote za uparjanje dodatne vode.

MSF porabi veliko več energije na m³ pitne vode (običajno 12–15 kWh in včasih celo 25 kWh). Za obratovanje toplotnega obrata za razsoljevanje sta potrebna dva tipa energije. Prva je nizkotemperaturna energija, ki predstavlja glavni del energije. Druga je električna energija, ki poganja črpalke. RO proces potrebuje električno energijo, ki napaja visokotlačne črpalke, po navadi 3–5 kWh (Olsson, G. 2015).

3.1 TERMIČNI PROCES

Tehnologija razsoljevanja je bila ustvarjena že v petdesetih letih 20. stoletja. Termalni proces razsoljevanja, ki je temeljil na izhlapevanju vode in zbiranju kondenza, je bil komercializiran že precej pred razvojem tehnologije razsoljevanja z reverzno osmozo (RO). Zgodovinsko so komercialni obrati razsoljevanja temeljili na termalnih procesih na lokacijah, kjer je bilo energije v izobilju ali pa je bila poceni, pitne vode pa je primanjkovalo. Posledično zagotavlja razsoljevanje obilno količino pitne vode na območju Srednjega vzhoda z obilico energetskega virov. Razsoljevanje je energetsko potratna tehnologija oskrbe s pitno vodo, zato je primerna možnost samo tam, kjer ni na razpolago drugih virov ali pa je strošek energije pri transportu zelo visok (Olsson, G. 2015).

3.1.1 VEČFAZNA RAVNOTEŽNA DESTILACIJA (MULTI STAGE FLASH)

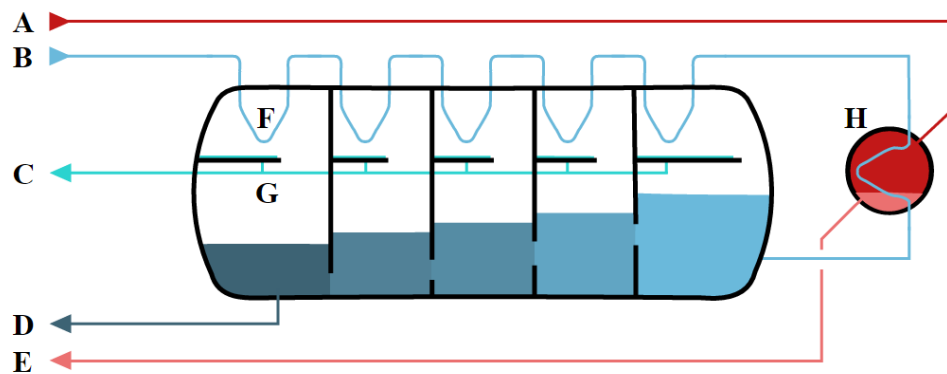
Proces se začne s segrevanjem slane vode s paro, ki se jo nato vodi skozi serijo stopenj, kjer se ta zaradi znižanega tlaka takoj upari, in sicer brez potrebe po dodatnem segrevanju. MSF proces razsoljevanja se večinoma uporablja za večje termične naprave za razsoljevanje, kjer je toplotna energija dostopna v obliki pare z nižjim tlakom (> 2 bar), na primer v kombinaciji z elektrarno ali industrijskim kompleksom.

Največja težava pri napravah tega tipa je korozija, zato se za proizvodnjo povratnega hladilnika uporablja posebno jeklo oz. kovino. Denimo za površino izmenjevalnika toplote v izparilnikih se uporablja cevi iz titana, da se zagotovi maksimalna učinkovitost naprave.

V MSF napravi se najprej surovo vodo segreje do najvišje temperature slаницe v posodi (grelnik slаницe) s kondenziranjem pare na skupku cevi, skozi katere se pretaka voda. Segreta slana voda nato steče v naslednjo fazo, kjer je tlak nižji. Zaradi tega voda takoj zavre, se hipoma pretvori v paro, dokler slаницa ne doseže temperature zasičenja. Ta postopek se ponovi v naslednjih fazah, vsakič pri nižji temperaturi in tlaku.

Para, ki se sprosti pri prehodu vsake faze, se kondenzira v pitno vodo na zunanji površini sklopov cevi izmenjevalnika toplote, ki tečejo skozi faze in nosijo hladnejšo surovo vodo. To omogoča postopno predgretje surove vode, kar zniža potrebno toplotno energijo grelnika slаницe. Kondenz, ki se ga pri tem proizvede, je vir razsoljene produktne vode (destilat). Shema MSF naprave je prikazana na sliki 4, na sliki 5 pa je prikazana naprava v Dubaju.

Proces MSF deluje z maksimalno učinkovitostjo pri temperaturi do $115\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posledično to pomeni veliko napravo in nižjo porabo energije.



A – para noter, B – morska voda noter, C – pitna voda ven, D – odpadna voda ven, E – para ven,
F – izmenjava toplote, G – zbiranje kondenza, H – grelnik slanice

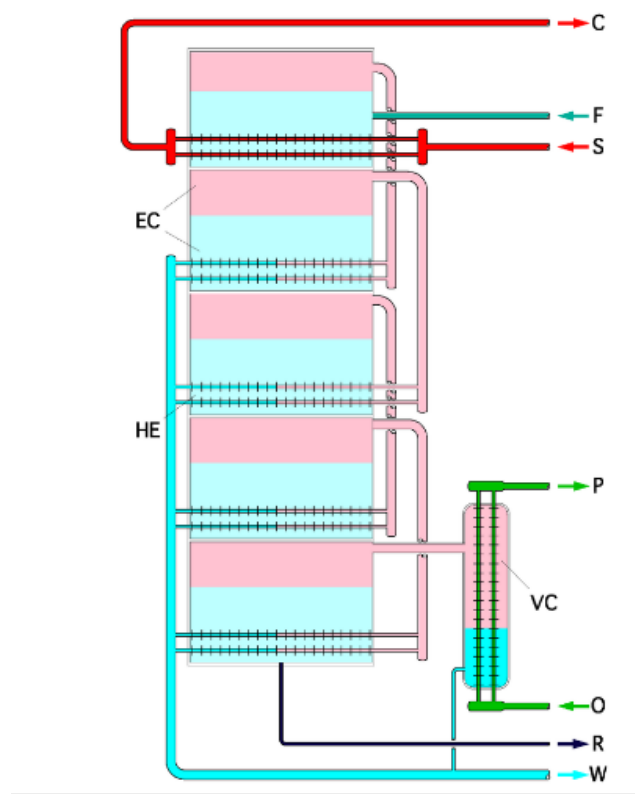
Slika 4: Shema MSF razsoljevalnika (vir: Wikipedia)



Slika 5: MSF naprava za razsoljevanje v Dubaju (vir: Wikipedia)

3.1.2 VEČSTOPENJSKA DESTILACIJA (MED)

MED napravo se lahko predstavlja kot zaporedje komor, ki so ločene s stenami cevi, z virom toplote na enem koncu in porabnikom toplote na drugem. Vsaka komora je ločena z dvema podprostoroma, zunanjim delom cevi faze n in notranjim delom cevi faze $n + 1$. Vsaka komora ima nižjo temperaturo in tlak kot prejšnja komora in stene cevi imajo vmesno temperaturo med temperaturo tekočin na vsaki strani. Tlak v komori ne more biti v ravnovesju s temperaturo sten obeh podkomor, zato ima vmesni tlak. Ker je tlak prenizek ali je temperatura previsoka v prvi podkomori, voda izhlapi. V drugi podkomori je tlak previsok ali je temperatura prenizka, zato para kondenzira. S tem se prenaša energija izhlapevanja od toplejše prve podkomore do druge hladnejše podkomore. Pri drugi podkomori energija teče preko sten cevi s kondukcijo do naslednje hladnejše komore (Wikipedia: Multiple-effect distillation).



Rožnato območje predstavlja paro; svetlomodro območje predstavlja tekočo napajalno vodo; temnejša modra barva predstavlja kondenzat

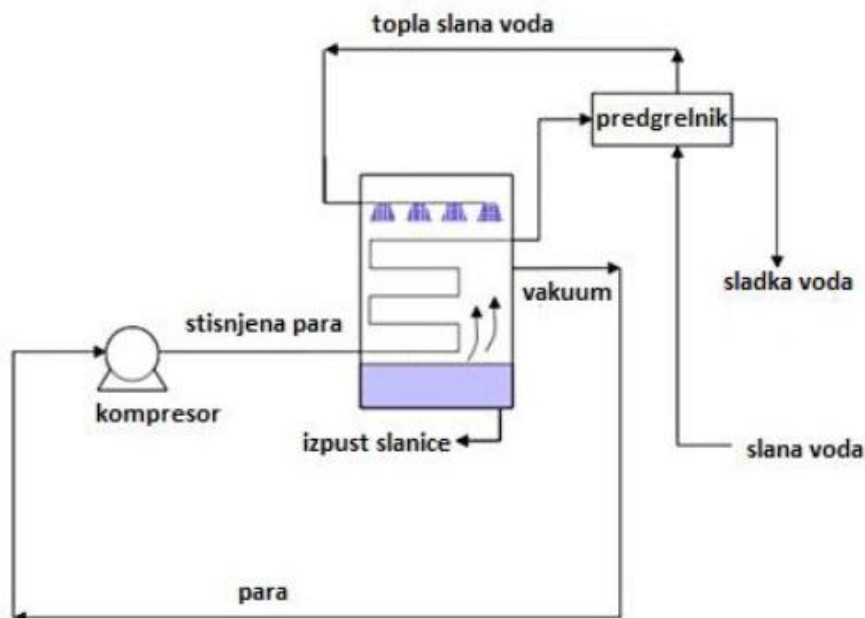
F – napajalna voda, S – para noter, C – para ven, W – sveža voda (kondenzat) ven, R – slanica ven, O – hladilna tekočina noter,

P – hladilna tekočina ven, VC – hladilnik v zadnji fazi.

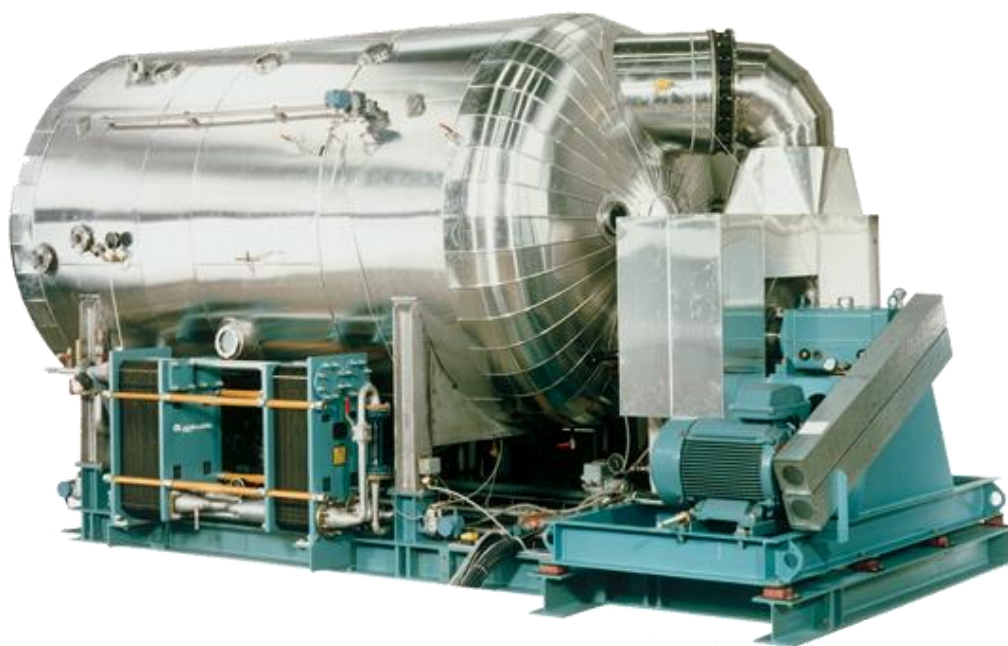
Slika 6: Shema MED naprave (vir: Wikipedia)

3.1.3 KOMPRESIJA HLAPOV (VC)

Procesi kompresije hlapov so odvisni od obratovanja pri znižanemu tlaku, ki vodi evaporacijo. Toploto za evaporacijo se pridobi s stiskanjem pare z mehanskim kompresorjem (v nadaljevanju MVC) ali s parnim ejektorjem (v nadaljevanju TVC). Procesi z mehanskim stiskanjem pare (MVC) so primerni za majhne do srednje velike naprave. Velikost MVC naprav se po navadi giblje okrog 3000 m³/dan, medtem ko se velikost TVC naprav giblje okrog 20.000 m³/dan. MVC sistemi imajo običajno samo eno stopnjo, medtem ko imajo TVC sistemi več stopenj. Ta razlika nastane zato, ker imajo MVC sistemi enako specifično porabo energije (moč/enoto produkta) ne glede na število stopenj. TVC sistemom pa se učinkovitost večja z dodajanjem dodatnih stopenj (Miller, E. J., 2003).



Slika 7: Shema MVC procesa (Miller, E. J., 2003)



Slika 8: Primer MVC naprave (vir: www.alfalaval.com)

3.2 MEMBRANSKI PROCES

Pri membranski filtraciji je snov fizično ločena na podlagi polprepustne membrane. Ta proces deluje na podlagi tlaka, ki deluje na membrano. Ta sila potisne najmanjše molekule v raztopini skozi membrano in zadrži večje molekule. Ločevanje snovi z membrano na podlagi tlaka lahko razdelimo na štiri tipe (Olsson, G. 2015):

- Mikrofiltracija (v nadaljevanju MF) loči delce od 0,1 do 0,5 mikrona (10^{-6} m);
- Ultrafiltracija (v nadaljevanju UF) loči delce od 0,005 do 0,05 mikrona;
- Nanofiltracija (v nadaljevanju NF) loči delce od $0,5 \times 10^{-3}$ do 1×10^{-3} mikrona;
- Reverzna osmoza (v nadaljevanju RO) loči delce nekje do 1 angstrema (10^{-4} mikrona).

MF lahko odstrani suspendirane snovi, vrste z višjo molekularno težo, bakterije, patogene, kot sta *Cryptosporidium* in *Giardia* v pitni vodi. *Cryptosporidium* je parazit, ki se običajno pojavlja v jezerih in rekah, ki so onesnažene z odplakami ali živalskimi izločki. MF in UF tehniki ne potrebuje kemikalij za onesposabljanje mikrobov. Čiščenje vode z UF odstrani makromolekule, koloide, viruse, proteine in pektine. UF ne odstrani vseh naravnih mineralov, kot je denimo kalcij, ali, kar je bolj pomembno, slanosti vode. NF lahko odstrani manjše molekule in polivalentne ione, kot sta kalcij in magnezij, medtem ko je potrebna RO za odstranitev raztopljenih soli, manjših ionov, barvil in vrst z nizko molekularno težo (Olsson, G. 2015).

Ti štirje tipi membranske filtracije se razlikujejo tudi glede na višino tlak, pod katerim normalno obratujejo. MF in UF potrebujeata nekoliko nižji tlak, medtem ko NF in RO potrebujeata višji tlak. Običajno NF potrebuje 10–40 bar, RO pa med 15–70 bar. Nad optimalnim tlakom se pojavi mašenje »por« in membrana se kompaktira (Olsson, G. 2015).

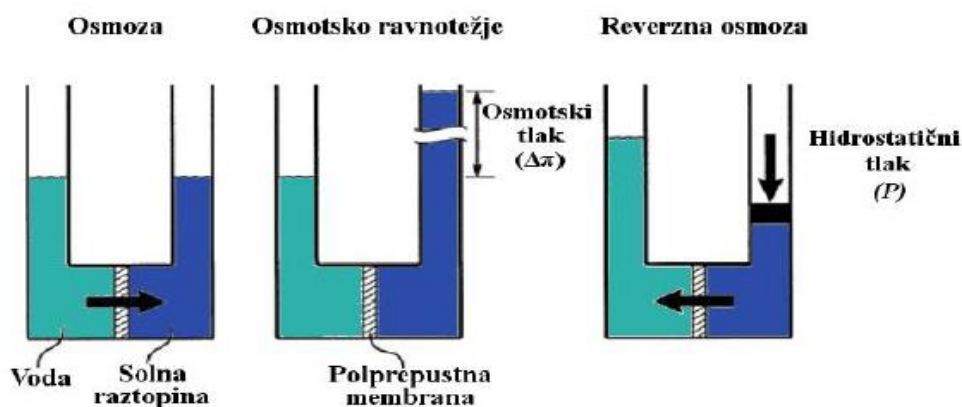
3.2.1 REVERZNA OSMOZA (RO)

Prva uspešna predstavitev membrane za RO, ki je delovala, je bila izvedena leta 1959. To je pomenilo začetek razsoljevanja z metodo RO. V sistemu polne velikosti so RO elementi zapečateni v posodah. Večje število posod je postavljenih na podstavkih, ki lahko obratuje vzporedno ali zaporedno. Ker RO membrane ne dopuščajo nobenih trdih delcev, je potrebno predčiščenje, ki je sestavljeno tako iz različnih tipov filtracije in postopkov ločevanja kot tudi obdelave vode s kemikalijami. Odpadna voda po RO postopku filtracije nosi s seboj še vedno veliko energije, ki se jo lahko vrne nazaj v proces, kar zniža potrebno energijo za RO. Tehnike razsoljevanja, ki uporabljajo RO (tiste, ki uporabljajo brakično vodo ali morsko vodo), so sedaj najbolj široko zastopane. Predvideno je, da bo uporaba RO letno zrasla za 10 % (Olsson, G. 2015).

Glavni razlog, ki je vplival na vsesplošno uporabo membranskega razsoljevanja, je bila visoka potreba po energiji. Največji porabnik energije je visokotlačna črpalka. Potreba po energiji je odvisna od slanosti vode, temperature vode in obnovitve sistema. Potreba po energiji v RO procesu se poveča z višjo slanostjo. Razvoj izmenjevalcev prihranjene energije različnih konfiguracij lahko povrnejo več kot 90 % koncentriranega toka. Ostali razvoj vključuje izboljšane materiale, kot so tako kompozitne membrane s tankim filtrom kot napredki v oblikovanju in delovanju RO naprav. Pomemben del izboljšav vključuje vpeljavo MF in UF filtrov z nizkim tlakom za predobdelavo. Stroški razsoljevanja prihajajo z dveh področij: obdelave in upravljanja s koncentratom. Stroški obdelave so se znatno znižali zaradi visokozmogljivih membran, cenejših membranskih modulov, naprav za povratek energije in večje konkurence. Na drugi strani pa so stroški upravljanja s koncentratom močno odvisni od lokacije. Pri lociranju naprave za razsoljevanje blizu morja omogoča večjo fleksibilnost, kot če bi napravo postavili v notranjosti. Naprave, ki so postavljene v notranjosti, se lahko uporabi pri ponovni uporabi vode in proizvodnji pitne vode iz odpadne vode, kjer so običajni vodni viri nezadostni. Pri napravah v notranjosti je treba dobro premisliti o možnostih odstranitve odpadne vode. Primarna skrb pri odstranjevanju koncentrata v površinske vode, kanalizacijo ali po površini je obremenitev površinskih voda ali podtalnice s soljo (Olsson, G. 2015).

RO dominira na področju tehnologije razsoljevanja in uporaba RO naj bi se v naslednjih desetletjih še povečala. Da bi razumeli osnove RO, si najprej pogledajmo osmozo, ki je osnova RO (prim. Slika 9). Naravna osmoza uravnava, kako se prepušča voda med dvema raztopinama z različno koncentracijo. To je osnova za delovanje naše kože in organov in tudi za ohranjanje vodnega ravnovesja v flori in

favni. Proces osmoze lahko ponazorimo, kadar se med dvema raztopinama z različno vsebnostjo soli nahaja polprepustna ovira, kot je na primer membrana (Olsson, G. 2015; Lugarič, 2013).



Slika 9: Osnovni princip osmoze, osmotskega ravnotežja in reverzne osmoze (Lugarič, 2013).

Pri naravni osmozi ima voda tendenco teči od raztopine z nižjo koncentracijo do vode z višjo koncentracijo, dokler ne deluje nanjo zunanji tlak. Kadar pa na raztopino z višjo koncentracijo deluje zunanji tlak (Δp), ki presega osmotsko tlačno razliko ($\Delta\pi$), bo iz raztopine z višjo koncentracijo pričela preko membrane teči čista voda, medtem ko bodo soli ostale v raztopini z višjo koncentracijo. Teoretično naj soli ne bi prehajale preko membrane. V praksi pa prihaja do tega zaradi difuzije.

Osmotski tlak π je podan z Van't Hoffovo enačbo:

$$\Pi = c \times R \times T \quad (1)$$

Ob predpostavki, da je c ionska molska koncentracija, R plinska konstanta in T temperatura v kelvinih, lahko sklenemo, da se potreben tlak viša s koncentracijo soli.

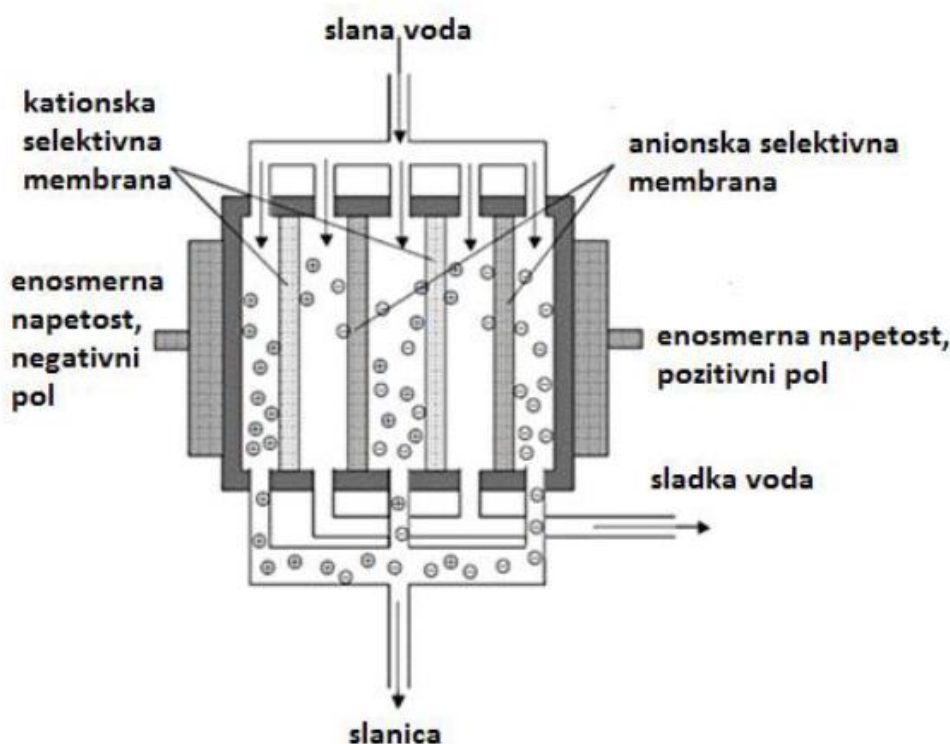
Vodni tok je proporcionalen glede na razliko v tlaku:

$$J_w = C (\Delta p - \Delta\pi) \quad (2)$$

Če je J_w tok (l/m^2 membrane na uro) in C konstanta gre majhen delež raztopljenе snovi tudi preko membrane skupaj z vodo. Pri RO gre približno 2 % običajne soli (Na Cl) skozi filter. Osmotski tlak za morsko vodo s 3 % soli je 17–18 bar. To pomeni, da RO sistem prične proizvajati vodo, ko je dosežen višji tlak kot osmotski tlak. Brakična voda potrebuje manj energije, saj je osmotski tlak nižji (Olsson, G. 2015).

3.2.2 ELEKTRODIALIZA (ED)

Pri elektrodializi (v nadaljevanju ED) se uporablja enosmerni tok in nekaj pretočnih kanalov, ki so ločeni z izmenjajočimi anionsko in kationsko selektivnimi membranami, da se doseže ločitev vode in raztopljenih soli. Shema postopka je prikazana na sliki 10. Ker je za ločitev vode in raztopljenih soli potreben električni tok, je za razliko od RO ali destilacije, ED tehnologija sposobna odstraniti le ionske komponente iz raztopine (Miller E. J., 2003).

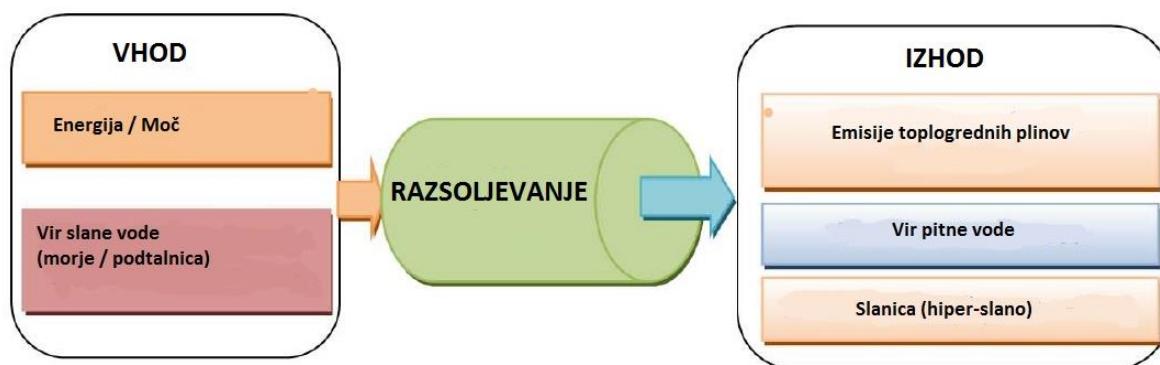


Slika 10: Shema razsoljevanja z ED (vir: Miller E. J., 2003)

Pri ED procesu se slano vodo vodi v vzporednih kanalih. Kationi in anioni nato zaradi uporabljene napetosti migrirajo v nasprotnih smereh. Zaradi selektivnosti membran se ionska koncentracija poviša in zniža po kanalih izmenično. Samo en tak sklad membran je lahko sestavljen iz stotine izmenjajočih kanalov. Ker se upornost v skladu spreminja od vrha do dna, se ločevanje po navadi izvaja v manjših korakih. Zaradi tega je proces bolj ekonomičen in ga je tudi lažje nadzirati. Kot pri RO, se energija potrebna za ločevanje ionov iz raztopine, poveča s koncentracijo, zato se ED po navadi uporablja le za brakične vode, ki vsebujejo le nekaj tisoč *ppm* raztopljenih trdnih snovi (Miller E. J., 2003).

4 VPLIV NA OKOLJE

Na spodnji sliki (prim. Slika 11) je prikazana shema vstopnih in izstopnih elementov pri razsoljevanju. Vstopajo slana voda s pribitkom energije za začetek kemijskega procesa, izstopajo pa sladka voda, izločena sol (v obliki slanice) in emisije toplogrednih plinov (če so vir vstopne energije fosilna goriva) (Dawoud in Al Mulla, 2012).



Slika 11: Shema vstopnih in izstopnih elementov pri razsoljevanju (Dawoud in Al Mulla, 2012).

Razsoljevanje morske vode z zagotavljanjem na videz neomejenih konstantnih količin sladke vode brez velikih posegov v vodne ekosisteme prinaša veliko število pozitivnih učinkov za zdravje ljudi, ekonomsko-socialne razmere in okolje. Ampak vseeno se pojavljajo vprašanja glede potencialnih negativnih posledic (Dawoud, 2006). Negativne posledice so povezane predvsem s koncentracijo in (bio)kemijskimi izpusti kot stranskimi produkti samega procesa razsoljevanja ter so tudi odvisne od vira morske vode. Ti izpusti lahko negativno vplivajo na kakovost obalne vode, obalne in morske ekosisteme ter z emisijami tudi na kakovost zraka. Slednje je odvisno od reagenta, uporabljenega pri procesu razsoljevanja (Dawoud in Al Mulla, 2012).

4.1 VIR SLANE VODE

Industrijski obrati za razsoljevanje lahko dobijo slano vodo iz različnih virov, a najpogosteje je to morska voda. Pri odprtih vtokih v obrat lahko zaradi vnosa v obrat prihaja do izgube morskih organizmov. Črpanje morske vode povzroča motnje na morskem dnu, vrtnčenje in mešanje materiala, usedlin, hranil in onesnaževal. Območje postane nestabilno za obstoječe življenje. Ustvarijo se umetni morski grebeni, spremenijo se pogoji za ekosistem, ljudje lahko posledice občutijo pri drugih dejavnostih (denimo pri ribolovu, na vodnih transportnih poteh) (Dawoud in Al Mulla, 2012).

4.2 IZSTOPNA SLANICA

Razsoljevanje navadno ustvarja velike količine slаницe, ki ima poleg visoke slanosti tudi višjo temperaturo, vsebuje ostanke procesov predobdelave, kemikalij, težkih kovin itd. Visoke koncentracije soli so izločene v bližnje morje, kar posledično pomeni večjo slanost in nevarnost za ekosisteme. V Perzijskem zalivu je koncentracija soli v morju približno 45 ppm, pri čemer obrati za razsoljevanje prispevajo v povprečju še dodatnih 5–10 ppm v bližini izpusta (prim. Slika 12).



Slika 12: Obrat razsoljevanja Al Ghubrah v Omanu. Na sliki je viden izpust slаницe v morje (BrineDis, 2016).

Kemijska predobdelava vode pred vstopom v proces z namenom zaščite membran in ostalih fizičnih delov, ki pridejo v stik z vodo, je nujna. Uporabljajo se kemikalije proti koroziji, vodnemu kamnu, penjenju, obraščanju organizmov itd. Ostanki ter stranski produkti se navadno izločajo v morje.

Do velikega negativnega vpliva na morsko življenje prihaja takrat, kadar zelo onesnaženi izpusti pridejo v stik z občutljivimi ekosistemi. Učinek je odvisen od fiziološko-kemijskih lastnosti izpustov in hidrografskih ter bioloških pogojev okolja. Zaprta in plitva območja z bogatim morskim življenjem naj bi bila bolj občutljiva na izpuste kot odprta območja z veliko pretočnostjo, ki imajo večjo kapaciteto, in s tem možnost razredčiti in razpršiti izpuste (Hoepner in Windelberg, 1996) (Dawoud in Al Mulla, 2012).

4.3 TEMPERATURA MORSKE VODE

V vseh Zalivskih državah je večina obratov za razsoljevanje povezana z elektrarnami, v katerih je temperatura vode v odplakah visoka in bo zato povišala temperaturo morske vode v bližini. V poletnih mesecih je v Zalivu povprečna temperatura morja okoli 35 °C, še dodatnih 7–8 °C pa se dvigne zaradi izpustov iz obratov za razsoljevanje oz. elektrarn.

Večina organizmov se lahko prilagodi manjšim odstopanjem od optimalnih slanosti in temperatur okolja ter lahko nekaj časa tudi tolerirajo ekstremne razmere, ne morejo pa tega početi dalj časa v neprijaznih okoliščinah. Konstantni izpusti z visokimi slanostmi in temperaturami so lahko usodni za morsko življenje in obenem lahko povzročijo trajne spremembe sestave ter razširjenosti okoliškega življenja. Morske organizme lahko spremembe v naravnem okolju bodisi privlačijo bodisi odbijajo. Tisti bolj prilagojeni novim pogojem bi sčasoma prevladali (Dawoud in Al Mulla, 2012).

4.4 TOPLOGREDNI PLINI

Razsoljevanje vode v Zalivskih državah za energente uporablja neobnovljiva fosilna goriva in ena izmed skrbi so izpusti toplogrednih plinov, ki imajo vpliv na klimatske spremembe. Veliko truda je bilo vloženega v rešitve, ampak pomembno je razlikovati med zmanjšanjem količine toplogrednih plinov in porabo energentov iz fosilnih goriv. Oboji bi bili zmanjšani samo z uporabo obnovljivih virov energije.

Industrija razsoljevanja po zaslugi velike porabe energije zelo onesnažuje zrak z izpusti NO_x in SO₂. Izpusti NO_x se zmanjšujejo zaradi tehnoloških posodobitev in izpusti SO₂ nihajo, odvisno ali se namesto zemeljskega plina uporablja nafta. Ta industrija je v Zalivskih državah drugi največji onesnaževalec s CO₂. Poraba fosilnih goriv naj bi v prihodnosti še naraščala ob odpiranju novih obratov zaradi povečevanja potreb po sladki vodi (Dawoud in Al Mulla, 2012).

4.5 RAZTOPLJEN KISIK

Izstopna slanica vpliva na količino raztopljenega kisika v bližini obratov razsoljevanja. Koncentracija in nasičenost kisika se bo zmanjševala zaradi slanosti in visokih temperatur odplak. Koncentracije raztopljenega kisika so odvisne tudi od temperatur morja, oddaljenosti od obrata, koncentracij kisika v odplakah in mešanja odplak z okoliško vodo (Dawoud in Al Mulla, 2012).

4.6 KONCENTRACIJA KLORA

V večini razsoljevalnih obratov se vstopni vodi dodaja klor za zmanjševanje obraščanja organizmov, kar vodi do formiranja spojin s klorom. Pri obratih reverzne osmoze se vstopna voda klorira in nato deklorira, preden doseže membrane. Koncentracije klora v odplakah so odvisne od doz, uporabljenih

pri kloriranju morske vode. Povečanje doz klora lahko vpliva na kakovost morske vode v okolici obrata in posledično vpliva na ekosisteme. Zaradi negativnih vplivov klora na okolje in zdravje ljudi se preučujejo druge alternativne kemikalije. Na območju Perzijskega zaliva se trenutno kot glavno nadomestilo klora uveljavlja klorov dioksid (Dawoud in Al Mulla, 2012).

4.7 TEŽKE KOVINE

Zlitine bakra in niklja se navadno uporabljajo kot material toplotnih izmenjevalnikov v destilirnih obratih, zato lahko koncentracije bakra, ki se v vodo izloča zaradi korozije, v slanici predstavljajo problem. Slanica iz revezne osmoze lahko vsebuje sledi železa, niklja, kroma in molibdena, ampak kontaminacije s težkimi kovinami so običajno pod kritičnimi mejami, ker v obratih razsoljevanja z reverzno osmozo dominira nekovinska oprema in tista iz nerjavečega jekla. Pričakovane koncentracije bakra v izpustnih vodah so okoli 15 – 100 µg/L, ampak to ne pomeni nujno, da bodo imele negativne vplive na okolje, saj se naravne koncentracije bakra v ustjih gibljejo okoli 0.1 – 100 µg/L (Dawoud in Al Mulla, 2012).

5 EKSPERIMENT

V pričujočem poglavju je izdelana študijo postavitve sistema razsoljevanja za oskrbo z vodo obmorskega mesta z 10.000 prebivalci. Izdelane so tri variante: prva z oskrbo 100 litrov na prebivalca na dan, druga z oskrbo 200 litrov na prebivalca na dan in tretja z oskrbo 300 litrov na prebivalca na dan. Glede na varianto bom izbral velikost (zmogljivost) razsoljevalne naprave, ocenil naložbo nakupa in postavitve, stroške obratovanja in velikost površine, na kateri bi naprava stala. Tehnologija naprave je reverzna osmoza.

Za vsako varianto so izračunane izgube v metrih vodnega stolpca in poraba električne energije. Uporabil sem formule, ki so se tudi sicer uporabljale pri podobnih projektih v preteklosti. Cene novih (industrijskih) razsoljevalnih naprav po navadi niso navedene v katalogih, zato sem se na podlagi nepisanega pravila odločil za znesek 900.000 € (1.000.000 \$) za vsakih 1000 m³ proizvedene sladke vode na dan (Quora, 2016). S pomočjo spodnjega krožnega diagrama (prim. Slika 13) so ocenjeni tudi preostali stroški naprave (Lenntech, 2016).



Slika 13: Delež stroškov razsoljevalne naprave RO (Lenntech, 2016).

Za potrebe te študije bom uporabil razsoljevalne naprave, ki proizvedejo točno takšno količino vode, kot je mesto potrebuje. Zavedam se, da v praktičnih primerih ni tako in obstajajo rezerve v kapacitetah.

5.1 VARIANTA 1 – 100 l

5.1.1 Podatki

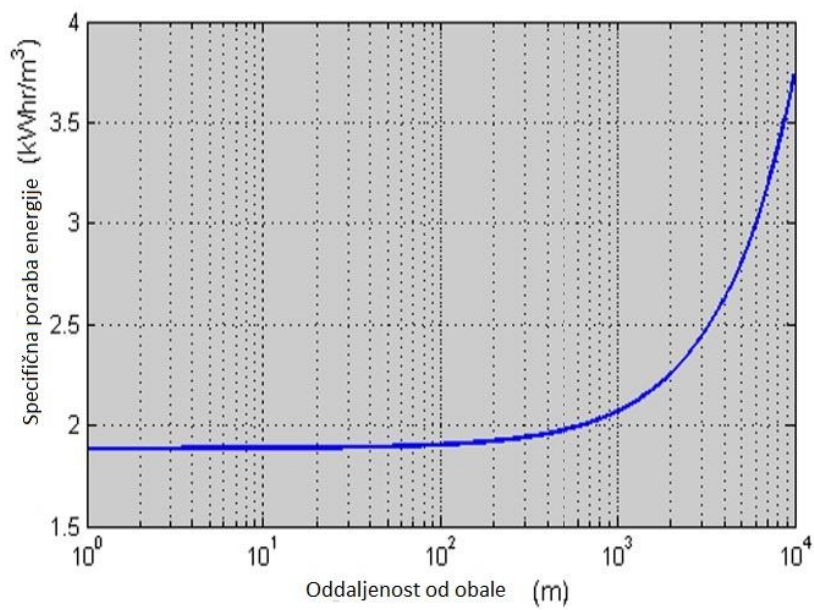
Mesto:

- Število prebivalcev: 10.000
- Oskrba vode na prebivalca: 100 l/dan
- Potrebna količina vode: 1.000.000 l/dan (1000 m³/dan)
- Oddaljenost naprave od črpališča morske vode: 2 km
- Razlika v nadmorski višini med napravo in črpališčem: 30 m

Naprava:

- Kapaciteta (C): 1000 m³/dan
- Izkoristek: 25 %
- Premer cevi za slano vodo (D): 0,25 m
- Premer cevi za slanico (D): 0,25 m
- Premer cevi za sladko vodo (D): 0,25 m
- Koeficient trenja vseh cevi (f): 0,012
- Dolžina cevi za slano vodo (L): 2 km
- Dolžina cevi za slanico (L): 2,5 km
- Dolžina cevi za sladko vodo (L): 20 m
- Gostota slane vode (ρ): 1025 kg/m³
- Gostota slane vode (ρ): 1035 kg/m³
- Gostota sladke vode (ρ): 1000 kg/m³
- Izkoristek črpalke (η): 80 %

Kapaciteta naprave pomeni količino proizvedene sladke vode. Izkoristek pomeni delež pridobljene sladke vode iz načrpane morske (25 % pomeni, da iz 4 l morske vode dobimo 1 l sladke vode; preostali 3 l so slanica). Odločil sem se, da je lokacija naprave oddaljena 2 km od lokacije črpanja morske vode (dejstvo, ali naselje leži na obali ali v notranjosti, ni pomembno). Dashtpout in Al-Zubaidi (2012) ugotavljata, da poraba energije za črpanje vode narašča eksponentno glede na oddaljenost od razsoljevalne naprave (Slika 14). Slanico se izpušča nazaj v morje, ki je od lokacije črpanja oddaljeno 0,5 km.



Slika 14: Poraba energije za črpanje glede na oddaljenost črpališča od razsoljevalne naprave
(Dashtpout in Al-Zubaidi, 2012).

5.1.2 Tlačne izgube

Pretok (Q) in tlačne izgube (H) izračunamo po naslednjih enačbah:

$$Q = \frac{C}{24 \times 3600} \quad (3)$$

$$H = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} \quad (4)$$

Pretok sladke vode:

$$Q = \frac{1000}{24 \times 3600}$$

$$Q = 0,0116 \frac{m^3}{s}$$

Pretok slane vode:

$$Q = \frac{1000}{24 \times 3600} \times 4$$

$$Q = 0,0436 \frac{m^3}{s}$$

Pretok slaniice:

$$Q = \frac{1000}{24 \times 3600} \times 3$$

$$Q = 0,0347 \frac{m^3}{s}$$

Tlačne izgube pri pretoku sladke vode:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times 20 \times 0,0116}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 0,24 \text{ m}$$

Tlačne izgube pri pretoku slane vode:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times (2000 + 30) \times 0,0436}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 90 \text{ m}$$

Tlačne izgube pri pretoku slanice:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times (2500 + 30) \times 0,0347}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 89 \text{ m}$$

Tlačne izgube sladke vode so zanemarljive v primerjavi s tlačnimi izgubami slane vode in slanice, saj sladka voda iz naprave potuje 30 metrov, medtem ko se slednji črpata 2 oziroma 2,5 kilometra.

5.1.3 Poraba električne energije

Moč naprave (P) in porabo električne energije (E) izračunamo po naslednjih enačbah:

$$P = \frac{\rho g h Q}{\eta} \tag{5}$$

$$E = \frac{P}{Q \times 3600} \tag{6}$$

Porabljena moč pri črpanju sladke vode:

$$P = \frac{1000 \times 9,81 \times (30 + 0,24) \times 0,0116}{0,8}$$

$$P = 4301,5 \text{ W}$$

Porabljena moč pri črpanju slane vode:

$$P = \frac{1025 \times 9,81 \times (30 + 90) \times 0,0436}{0,8}$$

$$P = 65761 \text{ W}$$

Porabljena moč pri črpanju slanice:

$$P = \frac{1035 \times 9,81 \times (30 + 89) \times 0,0347}{0,8}$$

$$P = 52407,8 \text{ W}$$

Skupna porabljena moč znaša:

$$P = 4301,5 + 65761 + 52407,8$$

$$P = 122.470,3 \text{ W} = 122,5 \text{ kW}$$

Poraba električne energije znaša:

$$E = \frac{122,5}{0,0116 \times 3600}$$

$$E = 2,93 \text{ kWh/m}^3$$

Za proizvodnjo 1 m³ sladke vode razsoljevalna naprava porabi 2,93 kWh električne energije.

5.1.4 Ekonomska analiza

5.1.4.1 Stroški letnega obratovanja

Stroški razsoljevalne naprave se delijo na (1) investicijske (cena naprave) in (2) obratovalne ter vzdrževalne (električna energija, rezervni deli, membrane, kadri, potrošni material). Cooley in Ajami (2012) ocenjujeta, da povprečna življenjska doba industrijske razsoljevalne naprave znaša med 20 in 30 leti. Ocenjujem, da je začetna investicija razsoljevalne naprave 900.000.

Po digramu na sliki 12 predstavlja 10-letna amortizacija (90.000 €) nove naprave 14 % vseh stroškov enega leta, strošek električne energije je 41 %, potrošnega materiala 26 %, rezervnih delov 11 %, membran 7 % in kadrov 1 % (Lenntech, 2016).

$$S = \frac{90.000 \text{ €}}{0,14} = 642.857 \text{ €}$$

Razdelani letni stroški razsoljevalne naprave s kapaciteto 1000 m³/dan znašajo:

- Amortizacija naprave (10 let): 90.000 €
- Kadri: 6427 €
- Membrane: 45.000 €
- Rezervni deli: 70.715 €
- Potrošni material: 167.142 €
- Električna energija: 263.572 €
- Skupni letni stroški (S): 642.857 €

Zavedam se, da je uporabljena metoda izračuna stroškov zelo pavšalna, ampak zaradi pomanjkanja izkušenj praktičnega udejstvovanja pri načrtovanju in postavljaju dejanskih razsoljevalnih naprav sem se odločil za zgornjo referenco. Prepričan sem, da bi bili realen delež in dejanski stroški pri izgradnji najverjetneje nekoliko drugačni, prav tako, kakor se tudi razsoljevalne naprave med seboj razlikujejo.

5.1.4.2 Stroški omejenega obratovanja

V kolikor je mesto večji del koledarskega leta oskrbovano z vodo iz drugih virov in razsoljevalne naprave ne potrebuje, je lahko zgodba drugačna v poletnih mesecih, ko se vodostaj celinske sladke vode zniža, po njej poveča potreba v kmetijstvu in v primeru, da je mesto pomembna turistična točka, se poveča tudi število ljudi.

V tem primeru, ko razsoljevalna naprava namesto dvanajstih obratuje le 2 meseca, so letni stroški seveda nižji. Letna amortizacija ostane ista, ostali ostali stroški pa znašalo šestino letnih.

Razdelani stroški razsoljevalne naprave za dva poletna meseca s kapaciteto 1000 m³/dan znašajo:

- Amortizacija naprave (10 let): 90.000 €
- Preostali letni stroški: 552.857 €

$$P' = \text{Amortizacija} + \frac{\text{Preostali letni stroški}}{6}$$

$$P' = 90.000 + \frac{552.857 \text{ €}}{6} = 182.142 \text{ €}$$

Letni strošek razsoljevalne naprave s s kapaciteto 1000 m³/dan, ki obratuje le dva meseca v letu, znaša 182.142 €.

5.2 VARIANTA 2 – 200 l

5.2.1 Podatki

Mesto:

- Število prebivalcev: 10.000
- Oskrba vode na prebivalca: 200 l/dan
- Potrebna količina vode: 2.000.000 l/dan (2000 m³/dan)
- Oddaljenost naprave od črpališča morske vode: 2 km
- Razlika v nadmorski višini med napravo in črpališčem: 30 m

Naprava:

- Kapaciteta (C): 2000 m³/dan
- Izkoristek: 25 %
- Premer cevi za slano vodo (D): 0,25 m
- Premer cevi za slanico (D): 0,25 m
- Premer cevi za sladko vodo (D): 0,25 m
- Koeficient trenja vseh cevi (f): 0,012
- Dolžina cevi za slano vodo (L): 2 km
- Dolžina cevi za slanico (L): 2,5 km
- Dolžina cevi za sladko vodo (L): 20 m
- Gostota slane vode (ρ): 1025 kg/m³
- Gostota slane vode (ρ): 1035 kg/m³
- Gostota sladke vode (ρ): 1000 kg/m³
- Izkoristek črpalke (η): 80 %

5.2.2 Tlačne izgube

Pretok sladke vode:

$$Q = \frac{2000}{24 \times 3600}$$

$$Q = 0,0231 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Pretok slane vode:

$$Q = \frac{2000}{24 \times 3600} \times 4$$

$$Q = 0,0926 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Pretok slanice:

$$Q = \frac{2000}{24 \times 3600} \times 3$$

$$Q = 0,0694 \frac{m^3}{s}$$

Tlačne izgube pri pretoku sladke vode:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times 20 \times 0,0231}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 0,47 \text{ m}$$

Tlačne izgube pri pretoku slane vode:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times (2000 + 30) \times 0,0926}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 191 \text{ m}$$

Tlačne izgube pri pretoku slanice:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times (2500 + 30) \times 0,0694}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 178 \text{ m}$$

Tlačne izgube sladke vode so zanemarljive v primerjavi s tlačnimi izgubami slane vode in slanice, saj sladka voda iz naprave potuje 30 metrov, medtem ko se slednji črpata 2 oziroma 2,5 kilometra.

5.2.3 Poraba električne energije

Porabljena moč pri črpanju sladke vode:

$$P = \frac{1000 \times 9,81 \times (30 + 0,47) \times 0,0231}{0,8}$$

$$P = 8631 \text{ W}$$

Porabljena moč pri črpanju slane vode:

$$P = \frac{1025 \times 9,81 \times (30 + 191) \times 0,0926}{0,8}$$

$$P = 257.221 \text{ W}$$

Porabljena moč pri črpanju slanice:

$$P = \frac{1035 \times 9,81 \times (30 + 178) \times 0,0649}{0,8}$$

$$P = 171.328 \text{ W}$$

Skupna porabljena moč znaša:

$$P = 8631 + 257.221 + 171.328$$

$$P = 437.180 \text{ W} = 437,2 \text{ kW}$$

Poraba električne energije znaša:

$$E = \frac{437,2}{0,0231 \times 3600}$$

$$E = 5,26 \text{ kWh/m}^3$$

Za proizvodnjo 1 m³ sladke vode razsoljevalna naprava porabi 5,26 kWh električne energije.

5.2.4 Ekonomska analiza

5.2.4.1 Stroški letnega obratoavnja

Ocenjujem, da je začetna investicija razsoljevalne naprave 1.800.000 €.

Po digramu na sliki 12 predstavlja 10-letna amortizacija (180.000 €) nove naprave 14 % vseh stroškov enega leta, strošek električne energije je 41 %, potrošnega materiala 26 %, rezervnih delov 11 %, membran 7 % in kadrov 1 % (Lenntech, 2016).

$$S = \frac{180.000 \text{ €}}{0,14} = 1.285.715 \text{ €}$$

Razdelani letni stroški razsoljevalne naprave s kapaciteto 1000 m³/dan znašajo:

- Amortizacija naprave (10 let): 180.000 €
- Kadri: 12.855 €
- Membrane: 90.000 €
- Rezervni deli: 141.430 €
- Potrošni material: 334.285 €
- Električna energija: 527.145 €
- Skupni letni strošek (S): 1.285.715 €

5.2.4.2 Stroški omejenega obratovanja

Razdelani stroški razsoljevalne naprave za dva poletna meseca s kapaciteto 2000 m³/dan znašajo:

- Amortizacija naprave (10 let): 180.000 €
- Preostali letni stroški: 1.105.715 €

$$P' = \text{Amortizacija} + \frac{\text{Preostali letni stroški}}{6}$$

$$P' = 180.000 + \frac{1.105.715 \text{ €}}{6} = 364.286 \text{ €}$$

Letni strošek razsoljevalne naprave s s kapaciteto 2000 m³/dan, ki obratuje le dva meseca v letu, znaša 1.105.715 €.

5.3 VARIANTA 3 – 300 I

5.3.1 Podatki

Mesto:

- Število prebivalcev: 10.000
- Oskrba vode na prebivalca: 300 l/dan
- Potrebna količina vode: 3.000.000 l/dan (3000 m³/dan)
- Oddaljenost naprave od črpališča morske vode: 2 km
- Razlika v nadmorski višini med napravo in črpališčem: 30 m

Naprava:

- Kapaciteta (C): 3000 m³/dan
- Izkoristek: 25 %
- Premer cevi za slano vodo (D): 0,25 m
- Premer cevi za slanico (D): 0,25 m
- Premer cevi za sladko vodo (D): 0,25 m
- Koeficient trenja vseh cevi (f): 0,012
- Dolžina cevi za slano vodo (L): 2 km

- Dolžina cevi za slanico (L): 2,5 km
- Dolžina cevi za sladko vodo (L): 20 m
- Gostota slane vode (ρ): 1025 kg/m³
- Gostota slane vode (ρ): 1035 kg/m³
- Gostota sladke vode (ρ): 1000 kg/m³
- Izkoristek črpalke (η): 80 %

5.3.2 Tlačne izgube

Pretok sladke vode:

$$Q = \frac{3000}{24 \times 3600}$$

$$Q = 0,0347 \frac{m^3}{s}$$

Pretok slane vode:

$$Q = \frac{3000}{24 \times 3600} \times 4$$

$$Q = 0,1389 \frac{m^3}{s}$$

Pretok slane:

$$Q = \frac{3000}{24 \times 3600} \times 3$$

$$Q = 0,1042 \frac{m^3}{s}$$

Tlačne izgube pri pretoku sladke vode:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times 20 \times 0,0347}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 0,70 \text{ m}$$

Tlačne izgube pri pretoku slane vode:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times (2000 + 30) \times 0,1389}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 286,6 \text{ m}$$

Tlačne izgube pri pretoku slanice:

$$H = \frac{8 \times 0,012 \times (2500 + 30) \times 0,1042}{9,81 \times \pi^2 \times 0,25^5}$$

$$H = 267,9 \text{ m}$$

Tlačne izgube sladke vode so zanemarljive v primerjavi s tlačnimi izgubami slane vode in slanice, saj sladka voda iz naprave potuje 30 metrov, medtem ko se slednji črpata 2 oziroma 2,5 kilometra.

5.3.3 Poraba električne energije

Porabljena moč pri črpanju sladke vode:

$$P = \frac{1000 \times 9,81 \times (30 + 0,70) \times 0,0347}{0,8}$$

$$P = 13.063 \text{ W}$$

Porabljena moč pri črpanju slane vode:

$$P = \frac{1025 \times 9,81 \times (30 + 286,6) \times 0,1389}{0,8}$$

$$P = 552.734 \text{ W}$$

Porabljena moč pri črpanju slanice:

$$P = \frac{1035 \times 9,81 \times (30 + 267,9) \times 0,1042}{0,8}$$

$$P = 393.965 \text{ W}$$

Skupna porabljena moč znaša:

$$P = 13.063 + 552.734 + 393.965$$

$$P = 959.762 \text{ W} = 959,8 \text{ kW}$$

Poraba električne energije znaša:

$$E = \frac{959,8}{0,0347 \times 3600}$$

$$E = 7,68 \text{ kWh/m}^3$$

Za proizvodnjo 1 m³ sladke vode razsoljevalna naprava porabi 7,68 kWh električne energije.

5.3.4 Ekonomska analiza

5.3.4.1 Stroški letnega obratovanja

Ocenjujem, da je začetna investicija razsoljevalne naprave 2.700.000 €.

Po digramu na sliki 12 predstavlja 10-letna amortizacija (270.000 €) nove naprave 14 % vseh stroškov enega leta, strošek električne energije je 41 %, potrošnega materiala 26 %, rezervnih delov 11 %, membran 7 % in kadrov 1 % (Lenntech, 2016).

$$S = \frac{270.000 \text{ €}}{0,14} = 1.928.571 \text{ €}$$

Razdelani letni stroški razsoljevalne naprave s kapaciteto 1000 m³/dan znašajo:

- Amortizacija naprave (10 let): 270.000 €
- Kadri: 19.285 €
- Membrane: 135.000 €
- Rezervni deli: 212.142 €
- Potrošni material: 501.427 €
- Električna energija: 790.712 €
- Skupni letni strošek (S): 1.928.571 €

5.3.4.2 Strošek omejenega obratovanja

Razdelani stroški razsoljevalne naprave za dva poletna meseca s kapaciteto 3000 m³/dan znašajo:

- Amortizacija naprave (10 let): 270.000 €
- Preostali letni stroški: 1.658.571 €

$$P' = \text{Amortizacija} + \frac{\text{Preostali letni stroški}}{6}$$

$$P' = 270.000 + \frac{1.658.571 \text{ €}}{6} = 546.428 \text{ €}$$

Letni strošek razsoljevalne naprave s s kapaciteto 3000 m³/dan, ki obratuje le dva meseca v letu, znaša 546.428 €.

5.4 KOMENTAR

Z zgoraj uporabljenno metodologijo, ki sem jo povzel po Dashtpout in Al-Zubaidi (2012), sem ocenil in izračunal stroške investicije ter letnih stroškov za oskrbovanje obmorskega mesta z razsoljeno vodo v treh variantah. Ker v teh variantah potreba po količini vode na prebivalca na dan narašča linearno (100 l, 200 l in 300 l), tudi velikost izbrane naprave ter vsi stroški naraščajo linearno. V primeru, da bi mesto vir vode iz razsoljevanja potrebovalo le v dveh poletnih mesecih, je strošek temu občutno manjši. Z ekonomskega vidika bi bilo nesmiselno tako drago napravo ne uporabljati večino časa (po mojih izračunih bi bili stroški obratovanja in vzdrževanja v dveh mesecih podobni stroški letne amortizacije). Zavedam se, da bi bili realni podatki pri postavitvi zelo drugačni.

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem se osredinil na analizo procesa razsoljevanja morske vode. Sladka voda za ljudi ni pomembna samo za zaužitje, ampak tudi za poljedelstvo, higieno, rekreacijo itd. Posamezna območja se za gradnjo industrijskih razsoljevalnih obratov odločajo zlasti zaradi povečevanja potreb, zmanjšanja obstoječih tradicionalnih virov, onesnaževanja in nedostopnosti do virov.

Poleg na osnovi velikosti in kapacitet se obrati delijo tudi glede na tehnologijo razsoljevanja. Procesi so ali termični ali membranski, slednji se delijo še naprej. V diplomski nalogi sem opisal zgodovino uporabe razsoljevanja, tehnologije in vplive na okolje. Jedrni del diplomske naloge predstavlja analiza postavitve razsoljevalne naprave z namenom oskrbovanja obmorskega mesta s sladko vodo.

Izbral sem si mesto z 10.000 prebivalci in izdelal ekonomsko študijo postavitve naprave v treh različicah – v proizvodnji 100 l, 200 l in 300 l sladke vode na prebivalca na dan. Za ceno nove naprave reverze osmoze sem si izbral znesek 900.000 € (1.000.000 \$) za vsakih 1000 m³ proizvedene sladke vode na dan, kar velja kot nenapisano pravilo v svetu načrtovanja tovrstnih naprav. Življenjska doba naprav v povprečju znaša 25 let.

Po mojih ocenah bi letni stroški (postavitve, obratovanje, vzdrževanje) znašali 642.857 € (100 l/dan), 1.285.715 € (200 l/dan) in 1.928.570 € (300 l/dan). Ti stroški so nedvomno višji, kot bi znašala dobava sladke vode z izkoriščanjem klasičnih celinskih vodnih virov. Zavedam se, da moji izračuni temeljijo na predpostavki, da bi naprave ves čas delovale s 100-odstotno zmogljivostjo in proizvedle točno takšno količino sladke vode, kot jo mesto potrebuje. V praksi seveda ni tako, saj imajo naprave rezerve v kapacitetah.

7 VIRI

BrineDis: *Environmental planning, prediction and management of brine discharges from desalination plants*. 2016.

<http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/envflu/research/brinedis/> (Pridobljeno 23. 7. 2016)

Cooley, H. in Ajami, N. 2012. *Key Issues for Desalination in California: Cost and Financing*. Oakland, California, Pacific Institute: 46 str.

Dashtpout, R. in Al-Zubaidi, S.N. 2012. Energy Efficient Reverse Osmosis Desalination Process. *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 3, Št 4, Avgust 2012: str 339–345.

Dawoud, M.A. 2006. *The Role of Desalination in the Augmentation of Water Supply in GCC Countries*. *Desalination*, Vol. 186, str 187–198.

Dawoud, M.A. in Al Mulla, M.M. 2012. Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. *International Journal of Environment and Susinability*, Vol. 1, No. 3, str 22–37.

Hoepner, T. in Windelberg, J. 1996. Elements of Environmental Impact Studies on Coastal Desalination Plants. *Desalination*, Vol. 108, str 11-18.

Lattemann, S. 2010. Development of an Environmental Impact Assessment and Decision Support System for Seawater Desalination Plants. *Doktorska disertacija*. Delft, TU Delft

Lenntech: Reverse Osmosis Desalination Costs Analysis. 2016.

<http://www.lenntech.com/processes/desalination/energy/general/desalination-costs.htm> (Pridobljeno: 7. 8. 2016)

Lugarič, G. 2013. Razsoljevanje vode. *Diplomska naloga*. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko (samozaložba G. Lugarič)

Miller, E., J. 2003. Review of water resources and desalination technologies

Olsson, G. 2015. Water and energy, IWA Publishing, London.

Quora: How much does a water desalination plant costs? 2016.

<https://www.quora.com/How-much-does-a-water-desalination-plant-cost> (Pridobljeno 10. 8. 2016)

Wikipedia: Multiple-effect distillation

https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-effect_distillation (Pridobljeno 25. 7. 2016)